

Электронный курс тепломассообмена

Представлен электронный курс теплообмена в энергетических установках, содержащий электронную книгу как структурированный гипертекстовый документ с изложением основных разделов теплообмена, Mathcad-документы с полным набором учебных компьютерных моделей теплообменных процессов и устройств, компьютерные лабораторные работы и учебные презентации.

Ключевые слова: теплообмен, массообмен, электронный курс, mathcad-программы, компьютерные модели.

THE ELECTRONIC COURSE OF HEAT AND MASS TRANSFER

The Electronic course of heat and mass transfer in power engineering is presented containing the full Electronic book as the structured hypertext document, the full set of Mathcad-documents with the whole set of educative computer models of heat and mass transfer, the computer labs, and selected educational presentations.

Keywords: heat transfer, mass transfer, electronic course, mathcad-programs, computer models.

Введение

Тепломассообмен принадлежит, по убеждению автора, к числу инженерных дисциплин, роль которых не ограничивается только узкопрофессиональной областью специального образования. Изучение теплообмена может быть важным фактором в формировании творческого специалиста нового стиля в связи с целым рядом замечательных свойств этой науки.

Самым очевидным из них является исключительно широкий спектр применений. Обеспечение необходимого температурного режима – это задача, важная в любой отрасли техники, не говоря уже о самом человеке как биологическом объекте, способном функционировать только в очень узком интервале температур. Негативным примером в этой сфере применений является катастрофа американского шаттла в связи с разрушением тепловой защиты, омрачившая историю космических исследований. В ядерной энергетике проблема безопасности напрямую связана с температурными режимами в штатных, аварийных ситуациях, как это было видно в случае аварии на АЭС Фукусима, когда отказ

систем аварийного охлаждения привел к расплавлению активной зоны реакторов. Эти примеры иллюстрируют меру ответственности и необходимость высокой квалификации специалистов в области теплообмена.

Важное гуманитарное измерение приобретает исследование и компьютерное моделирование теплообмена при взаимодействии океана и атмосферы (на границе раздела фаз). Погода и климат на планете в значительной степени определяются испарением /конденсацией водяных паров атмосферы на этой границе. От газообмена на водной поверхности существенно зависит содержание в земной атмосфере углекислого газа, ответственного за опасный парниковый эффект (проблема межфазного теплообмена в технических устройствах составляет сферу научных интересов автора статьи, см. [1]).

Другая характерная черта теплообмена – это глубокая математизация и компьютеризация научной дисциплины. В современных разработках требуется применение математических моделей на основе сложных систем дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих

пространственно-временную эволюцию скалярных полей температур и концентраций и векторных полей плотностей потоков тепла и массы. В арсенале исследователей – замечательные математические методы и модели, такие как теория пограничного слоя, методы возмущений и теории катастроф, модельные представления турбулентности, эффективные численные методы и т.п.

Автор полагает, что электронный курс теплообмена, адекватный отмеченным особенностям учебной дисциплины, поможет изучающему предмет пройти полезную начальную школу научного и инженерного творчества.

1. Структура электронного курса

Электронный курс теплообмена включает:

- электронную книгу – структурированный гипертекстовый документ с изложением основных разделов теплообмена как базовой научной и инженерной учебной дисциплины, в соответствии с учебными планами МЭИ;
- Mathcad-документы с полным набором компьютерных мо-



Александр Павлович Солодов,

д.т.н., профессор

Тел.: 8 (495) 362-77-60

Эл. почта: SolodovAP@mpei.ru

Национальный исследовательский

университет

«Московский энергетический

институт»

www.mpei.ru

Alexander P. Solodov,

Doctor of Science,

Honored Professor MPEI

Тел.: (495) 362-77-60

E-mail: SolodovAP@mpei.ru

National Research University "Moscow

Power Engineering Institute"

www.mpei.ru

делей для рассматриваемых в электронном учебнике проблем тепломассообмена;

- компьютерные лабораторные работы;
- учебные презентации сложных процессов тепломассообмена, макеты расчетных заданий и курсовых работ.

Изучение предмета организуется как разработка физических и математических моделей разного уровня сложности с их последующей компьютерной реализацией, преимущественно в математическом пакете Mathcad [2]. Акцент на компьютерных моделях соответствует современной тенденции, когда базой инженерного образования становится не рецептура элементарных расчетных формул, но разработка эффективных компьютерных моделей процессов и устройств, адекватно описывающих их функционирование в различных режимах (в том числе аварийных).

Систематическое использование Mathcad'a не ограничивает применений пособия для тех, кто работает с другими инженерными математическими пакетами. Форма записи математических соотношений практически совпадает с общепринятой «книжной» нотацией, поэтому коды вычислительных программ легко читать и при необходимости транслировать на другой язык программирования.

Учебные компьютерные модели служат базой для проведения практических занятий и лабораторных работ, выполнения расчетных заданий и курсовых проектов. Специальная глава посвящена применению пакета Matlab и его расширений для численного интегрирования двухмерных задач. Демонстрируются сложные многомерные термогидродинамические поля в виде анимаций, полученных в специализированных математических пакетах.

Пользователь имеет возможность двумя способами изучать содержание компьютерных моделей. Во-первых, читая электронную книгу, где программные блоки приводятся в качестве иллюстраций и снабжаются подробными ком-

ментариями. Во-вторых, работая с вычислительными программами в среде Mathcad, когда можно изменять входные параметры или даже тексты программ и наблюдать изменения в численных результатах, диаграммах и анимациях.

Электронная форма структурированного учебного курса обеспечивает удобную навигацию, благодаря перекрестным ссылкам на формулы, рисунки, вычислительные программы, термины, интернет-источники. Широко используются «живые» иллюстрации, т.е. анимации, нестационарных температурных полей, пограничных течений на проницаемых поверхностях и т.п. Электронный курс интерактивен – он предоставляет возможность проводить численные эксперименты с компьютерными моделями, изучать и модифицировать открытые коды программ.

Главная методическая установка курса состоит в том, чтобы раскрыть физическое содержание процессов тепломассообмена, применяя компьютерное моделирование и визуализацию результатов, и снабдить обучаемого современным расчетным инструментом для решения актуальных инженерных задач.

2. Электронная книга

Принципы тепломассообмена

В части первой электронного курса (гл. 1–4) сформулированы законы переноса теплоты, вещества, импульса, законы сохранения и дифференциальные уравнения тепломассообмена (рис. 1), рассмотрены способы постановки краевых условий. В кратком изложении даны основы неравновесной термодинамики.

На реальном примере показано, как решаются сложные задачи тепломассообмена, описываемые уравнениями в частных производных (гл. 5 «Компьютерное моделирование теплообмена: пакет Matlab», рис. 2).

Теплопроводность

В части второй электронного курса (гл. 6–10) рассмотрены зада-

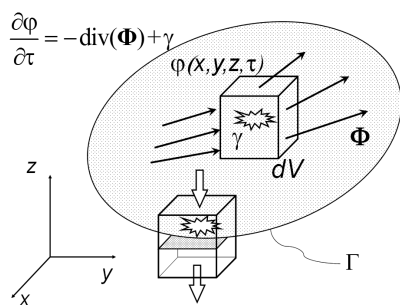


Рис. 1. К формулировке обобщенного уравнения сохранения:

ϕ – плотность переносимой величины, $[\phi] = (*) / \text{м}^3$; Φ – плотность потока этой величины, включающая кондуктивную и конвективную составляющие, $[\Phi] = (*) / (\text{м}^2\text{с})$; γ – мощность внутреннего источника, $[\gamma] = (*) / (\text{м}^3\text{с})$

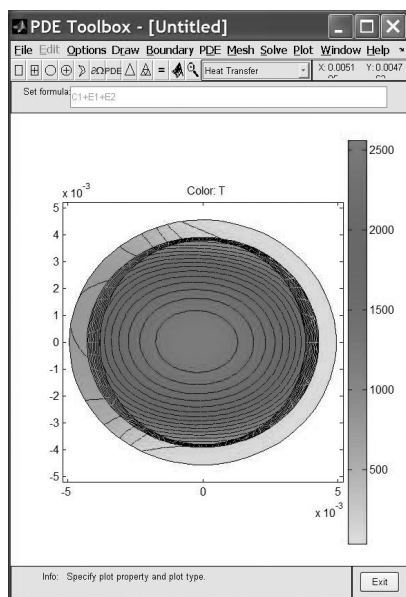


Рис. 2. Температурное поле в твэле: асимметрия распределения температуры, вызванная неравномерностью гелиевого зазора и ухудшенными условиями теплоотдачи на левом верхнем сегменте поверхности твэла

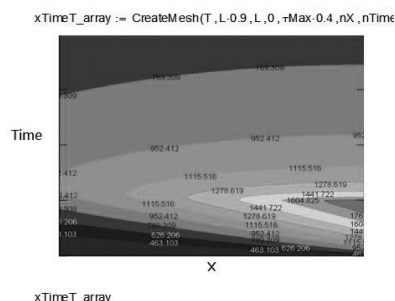


Рис. 3. Пространственно-временная диаграмма распределения температуры в стержне при импульсном воздействии

(треугольная область в правом нижнем углу показывает, на какой глубине X и в течение какого времени Time сохранялась высокая температура при импульсном лазерном воздействии)

чи теплопроводности. Изучаются одномерные стационарные задачи как основа для расчета теплопередачи через плоскую, цилиндрическую и сферическую стенки. Ставится проблема интенсификации теплопередачи посредством оребрения, решается задача о теплопроводности вдоль стержня при наличии теплообмена на боковой поверхности. Излагается методика оптимизации оребрения, иллюстрируемая компьютерной программой.

Подробно решена задача о теплопроводности в твэле ядерного реактора. Расчеты демонстрируют характерное распределение температуры в стержне с внутренними источниками тепла, в гелиевом зазоре и циркониевой оболочке твэла.

Классические задачи нестационарной теплопроводности рассмотрены как прообразы температурных полей в элементах энергетического оборудования при пусковых и переходных режимах. Анимационные видеоклипы применяются для иллюстрации асимптотических пределов (малых и больших времен, малых и больших чисел Био). Формулируется теорема о перемножении решений и дается перечень геометрических тел, для которых возможны ее применения. Особое внимание уделено задаче о прогреве полуограниченного массива (получена оценка толщины температурного пограничного слоя, введено понятие автомодельных переменных; как расчетный пример, решена задача Томсона об остывании Земли). Подробно рассмотрены температурные поля, создаваемые линейными и точечными источниками тепла, ввиду их важности для техники измерения теплофизических свойств.

Изложены основы численных методов теплопроводности. Сопоставлены явная и неявная схемы дискретизации. Подробно, с реализацией в виде вычислительной программы, представлен метод прогонки. Приведены примеры численного моделирования (в пакете Mathcad) периодических тепловых воздействий. Показано, как применяются встроенные функ-

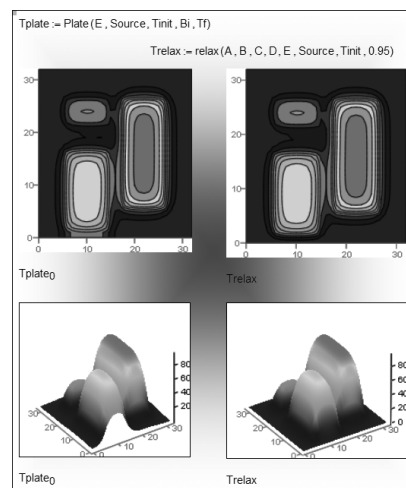


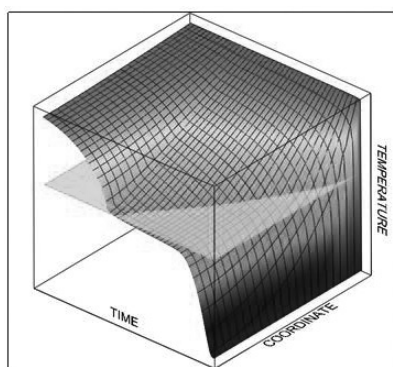
Рис. 4. Численное моделирование температурного поля платы компьютера в математическом пакете Mathcad

ции инженерных математических пакетов для интегрирования уравнений в частных производных. Рассмотрены численные методы для многомерных задач. Изложение поддерживается работой с компьютерными моделями (рис. 3 и 4).

В гл. 10 «Исследование одномерных нестационарных температурных полей методом численного эксперимента» вводится обобщенное одномерное дифференциальное уравнение для расчета нестационарных полей в тонких стержнях, пластинах, оболочках. Учитывается внутреннее тепловыделение, теплообмен на боковых поверхностях, продольный конвективный перенос. Эта глава является основой для расчетных заданий, курсовых учебно-исследовательских и квалификационных работ студентов, для компьютерных лабораторных работ.

Базовые задачи курса, решенные ранее аналитическими методами в упрощенной, идеализированной постановке, могут быть воспроизведены теперь на численных компьютерных моделях – с усложненными, реальными краевыми условиями, переменными свойствами материалов и т.п.

Рассматриваются примеры новых теплотехнологий. Моделируются мощные импульсные тепловые воздействия, например, с целью поверхностного упрочне-



xTimeT_array ,Tmelting

Рис. 5. Программа Melting (математический пакет Mathcad): пространственно-временные изменения температуры для задачи с фронтом плавления (горизонтальная плоскость – температура плавления).

ния или термической полировки. Анализируется распространение фронта фазового превращения в тепловом аккумуляторе (рис. 5). Решаются специальные задачи на основе *гиперболического* уравнения теплопроводности, учитывающего конечную скорость распространения температурных возмущений.

Конвективный тепломассообмен

Тема *третьей части* (гл. 11–16) электронного курса – конвективный тепломассообмен. В гл. 11 излагаются инженерные методы расчета тепломассообмена в энергетических установках. Посредством наглядных модельных представлений, методами оценки порядка величин выводятся основные закономерности конвективного теплообмена при вынужденной и свободной конвекции. Показано, что увеличивая скорость течения, можно создать высокие градиенты температуры у стенки и, следовательно, обеспечить большие значения теплового потока и коэффициента теплоотдачи. Приводятся критериальные расчетные соотношения для основных конфигураций, таких как продольное обтекание пластин и криволинейных профилей, поперечное обтекание труб и пучков труб, течение в трубах и каналах. Методом интерполяции между асимптотами получены *глобальные аппроксимации* для теплоотдачи, пригодные в широкой

области изменения определяющих параметров (чисел Рейнольдса, Прандтля, Рэлея). Задачи массообмена решаются в рамках аналогии между процессами теплообмена и массообмена.

Глава 12 посвящена фундаментальным основам конвективного тепломассообмена в пограничных слоях. Показано, как, исходя из представлений о тонком пограничном слое при течениях с большими числами Рейнольдса, посредством преобразований подобия свести сложную задачу с уравнениями в частных производных к системе обыкновенных дифференциальных уравнений (для динамического пограничного слоя – к уравнению Фолкнера – Скэн). Разработаны компьютерные программы и проведены расчеты тепломассообмена для *вынужденной и свободной конвекции*, в том числе на проницаемых стенках и с продольными градиентами давления (задачи управления пограничным слоем, рис. 6). Получены формулировки закона теплообмена как соотношения между локальным коэффициентом теплоотдачи и локальной толщиной пограничного слоя.

В гл. 13 рассматривается проблема *ламинарно-турбулентного перехода*. Анализируется эволюция малых возмущений ламинарного слоя смешения. Основным результатом – а именно, абсолютная неустойчивость потоков с перегибом на профиле скорости – применяется как эвристический критерий при анализе режимов сложных реальных течений. С методической стороны, гл. 13 является полезным пособием по применению метода малых возмущений в инженерных задачах, технике символьных вычислений, работе с дифференциальными уравнениями в комплексной области.

В гл. 14 изложены основы *интегрального метода* на примере локальной теплопередачи при поперечном обтекании трубы. Эта задача связана с проблемой надежности высокотемпературных поверхностей нагрева, таких как пароперегреватель тепловой электростанции.

Интегральный метод позиционируется как простой способ решения сложных задач пограничного слоя – со сложными граничными условиями и внешними воздействиями (с неизотермической поверх-

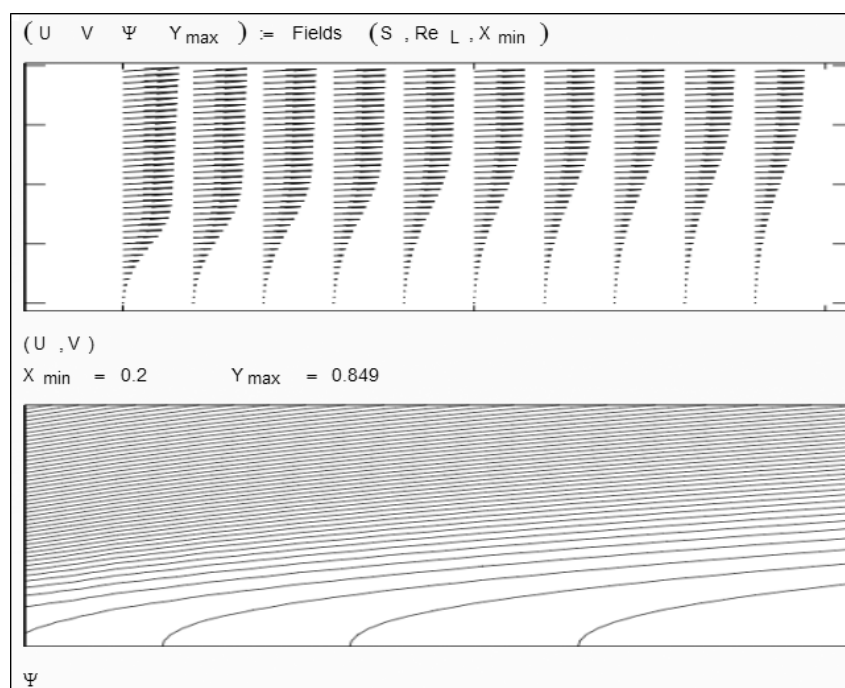


Рис. 6. Векторное поле скорости и функция тока при вдуве (математический пакет Mathcad)

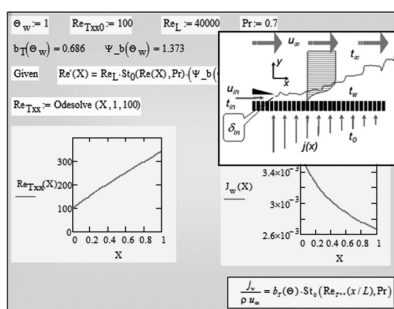


Рис. 7. Численное интегрирование уравнения теплового пограничного слоя методом Odesolve и расчет необходимой интенсивности вдува для защиты поверхности (математический пакет Mathcad)

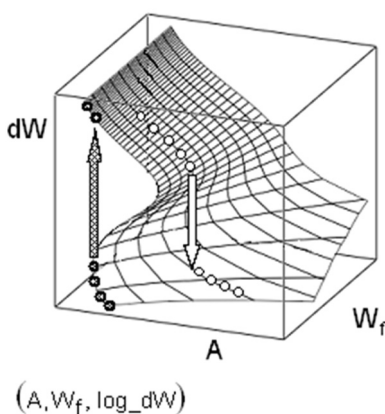


Рис. 8. Катастрофа сборки: скачки, соответствующие воспламенению (взрыву) и гашению пламени (математический пакет Mathcad)

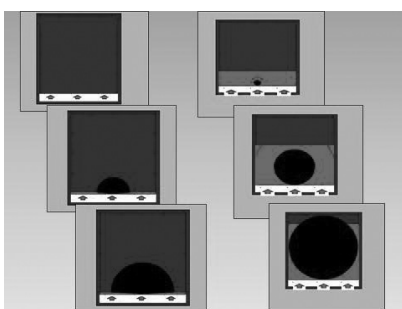


Рис. 9. Кадры анимации роста пузырьков при низком и высоком давлении (математический пакет Mathcad, [3])

хностью, со вдувом или отсосом через проницаемую стенку, с ускорением или замедлением потока при обтекании криволинейных поверхностей). Благодаря операции усреднения по толщине пограничного слоя, проблема сводится к интегрированию обыкновенных дифференциальных уравнений со

специальной структурой правой части. Инженерный пакет Mathcad предоставляет эффективное математическое обеспечение для решения таких задач.

Глава 15 «Тепломассообмен: горение, защита от высокотемпературных потоков» содержит дальнейшие приложения интегрального метода (рис. 7). Важной особенностью обеих рассмотренных здесь задач – горения частицы углерода и защиты от высокотемпературных потоков посредством вдува – является *проницаемость* стенки, т.е. отличие от нуля поперечного потока массы (и поперечной скорости) на стенке. Дополнительным объектом изучения становится интегральное уравнение *диффузионного* пограничного слоя. Тема совместно происходящих процессов тепло- и массообмена развивается далее в гл. 20.

Предыдущие гл. 14 и 15 электронного курса тематически связаны с функционированием так называемых теплонапряженных поверхностей нагрева. Работа установок в экстремальных условиях высоких температур и больших плотностей тепловых потоков требует надежного прогнозирования их поведения на нештатных режимах, при воздействиях внешних возмущающих факторов и т.п. В гл. 16 эта тема рассматривается в рамках «теории катастроф» – инженерной дисциплины, предметом которой является особая структура нелинейных математических моделей, содержащих неустойчивости и способных к резким, катастрофическим изменениям состояния – при весьма малых, незначительных вариациях внешних параметров. Сложное поведение такого рода демонстрируется на поучительных примерах нелинейных задач о тепловом взрыве (рис. 8) и об охлаждении кипящей жидкостью.

Двухфазный тепломассообмен

Часть четвертая (гл. 17–20) электронного курса посвящена двухфазному тепломассообмену.

Рассмотрены элементы термодинамики двухфазных сред, сформулированы условия фазового

равновесия с учетом поверхностного натяжения, проанализирована проблема частоты нуклеации. Сформулированы условия сопряжения на границе раздела фаз, рассмотрен эффект газокINETического сопротивления, описан феномен гидродинамической неустойчивости границы раздела.

Изложение модели Д.А. Лабунцова для пузырькового кипения дополняется презентацией (в формате «.ppt») компьютерной модели [3], сконструированной из известных элементарных механизмов, таких как перегрев жидкости при возобновляющемся контакте со стенкой, зарождение пузырьков на активных центрах парообразования, рост пузырьков в перегретой жидкости, испарение тонкой пленки под пузырьками. Модель иллюстрируется анимациями роста пузырьков при умеренных и высоких давлениях кипения (рис. 9). Для расчета плотности центров нуклеации привлекается представление о *фрактальной* природе шероховатых поверхностей нагрева.

Кипение в каналах представлено компьютерной моделью, воспроизводящей различные режимы, включая кризисные (рис. 10), грозящие пережогом.

Глава 19 содержит развернутое изложение теории пленочной конденсации. Основная идея – это раздельное рассмотрение четырех элементарных моделей конденсации (гравитационная пленка, ламинарная и турбулентная, плюс

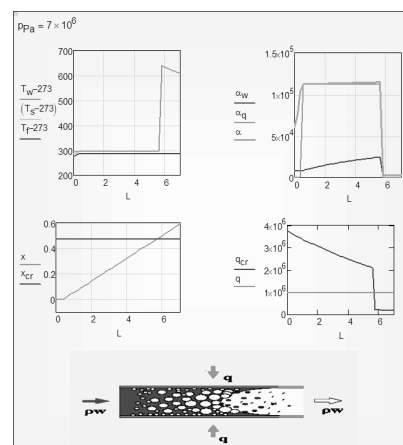


Рис. 10. Кризис высыхания при кипении в трубах (математический пакет Mathcad)

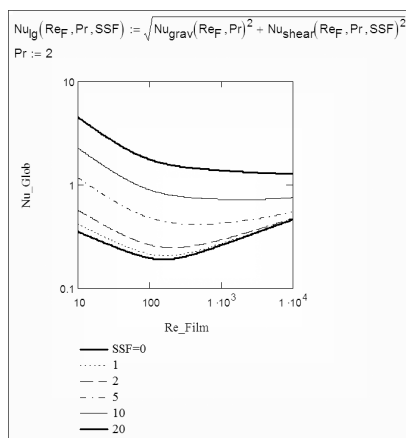


Рис. 11. Глобальная аппроксимация для конденсации движущегося пара (математический пакет Mathcad)

сдвиговая пленка, ламинарная и турбулентная) с последующим объединением в «глобальную» модель посредством метода интерполяции между асимптотами (рис. 11).

На модели турбулентной сдвиговой пленки наглядно демонстрируется применение классической Прандтлевской теории пути смешения для расчета коэффициентов турбулентного переноса. Полезным дополнительным результатом являются так называемые *пристенные функции* для расчета турбулентных потоков. Рассмотрена также специальная проблема *межфазной турбулентности*.

Как обычно в электронном курсе, изложение теории поддерживается разработкой компьютерных моделей. Представленная Mathcad-программа для расчета воздухоохлаждаемого конденсатора принадлежит к классу *одномерных дифференциальных моделей* тепло-массообменных устройств [4].

Заключает главу формулировка обобщенной модели пленочной конденсации на поверхностях произвольной формы с учетом градиентов капиллярного давления.

Глава 20 «Тепломассообмен в парогазовом потоке при конденсации и испарении» является логическим продолжением анализа двухфазного теплообмена. В прикладном отношении, важен эффект «отравления» конденсационных устройств накапливающимися по ходу парогазового потока примесями неконденсирующихся газов. В устройствах испарительного

охлаждения, таких как градирни энергетических установок или промышленные кондиционеры, тепломассообмен в парогазовой среде является основным процессом, лимитирующим их производительность. То же относится к конденсационным установкам для улавливания влаги из уходящих газов (продуктов сгорания).

Анализ осуществляется интегральным методом пограничного слоя. Для модельной задачи решаются уравнения динамического, теплового и диффузионного пограничных слоев с учетом фактора проницаемости поверхности раздела (т.е. отличия от нуля поперечного потока массы на границе).

Читателю предоставляется возможность провести самостоятельные исследования работы конденсатора из парогазовой смеси посредством прилагаемой компьютерной модели. Смысловым центром вычислительной программы является расчет температуры и концентрации на поверхности раздела фаз как важнейших внутренних характеристик процесса.

Радиационный теплообмен

В части пятой (гл. 21–23) электронного курса рассматривается радиационный теплообмен. При явно оговариваемых (и не слишком обременительных на практике) предположениях вводится матрица угловых коэффициентов,

зависящая только от геометрии системы поверхностей и одинаковая для геометрически подобных конструкций. Получены решения для замкнутой системы изотермических поверхностей, разделенных прозрачной средой, а также для задачи со смешанными условиями, когда на некоторых поверхностях задана плотность результирующего потока излучения (например, нулевая для адиабатной поверхности огнеупорной обмуровки парогенератора). Показано, как учитывается теплопроводность и конвекция в прозрачной газовой среде. Приведены аналитические решения для простых геометрических конфигураций.

Матричная модель применяется также для систем с излучающим и поглощающим газом. Излучение газа представляют как *взвешенную* сумму излучений смешанных серых газов с различными коэффициентами поглощения («the mixed grey-gas model»). Если температуры поверхностей заранее неизвестны и необходимо привлекать уравнение теплопередачи для граничных поверхностей (например, задавать температуру теплоносителя и коэффициент теплоотдачи в трубах пароперегревателя), определяющие уравнения становятся нелинейными. Для экспериментов с такой сложной радиационно-конвективной системой предло-

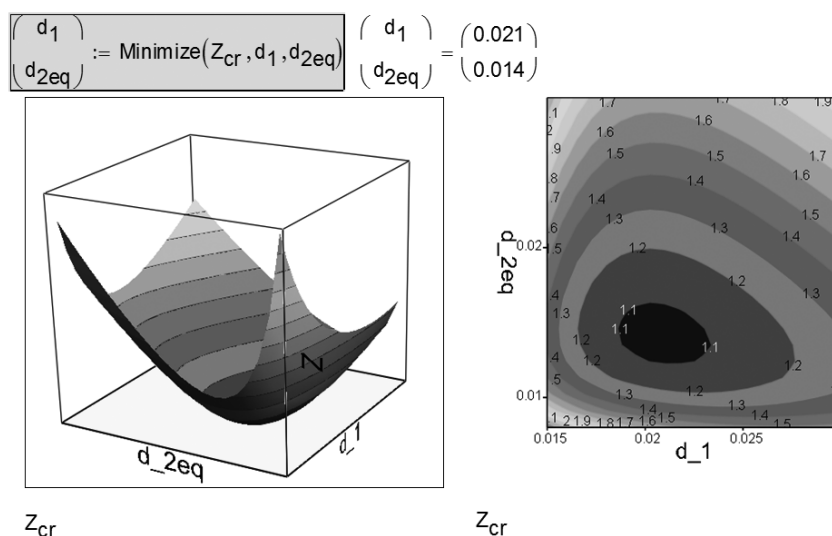


Рис. 12. Оптимизация теплообменников: суммарные затраты минимизируются (математический пакет Mathcad)

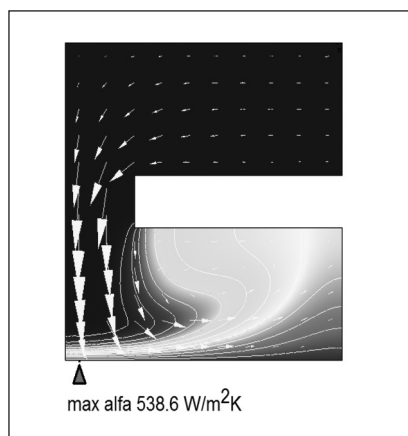


Рис. 13. Численное моделирование микротеплообменника с ударяющимися струями (стрелки – поле скоростей, линии – изотермы, цвет – температура)

ставляется компьютерная модель камеры сгорания.

Теплообменники

Часть шестая электронного курса содержит введение в теплообменники.

В гл. 24 «Основы теплогидравлического расчета поверхностных теплообменников» рассматриваются базовые понятия и элементарные алгоритмы проектирования теплообменников. Вводится понятие эффективности теплообменников, определяются предельные достижимые температуры теплоносителей, устанавливаются соотношения между эффективностью и числом единиц переноса тепла, решается задача оптимизации теплообменника (рис. 12).

Применяемое математическое описание теплообменника в форме одномерной дифференциальной модели допускает обобщение на сложные системы с проницаемыми поверхностями раздела и переменными расходами теплоносителей, когда система *обыкновенных* нелинейных дифференциальных уравнений сохранения массы, импульса, энергии потоков теплоносителей замыкается алгебраическими соотношениями для локальных поперечных потоков вещества, импульса, энергии [4].

Рассмотрена задача многокритериальной оптимизации теплообменников. Опираясь с

компьютерной моделью, можно спроектировать наилучший теплообменник, который обеспечит заданный тепловой поток и обойдется потребителю минимальными суммарными затратами (рис. 12).

В гл. 25 «Микротеплообменники» рассмотрен новый класс теплообменников, с малыми характерными размерами каналов в диапазоне $\delta \sim 10 \text{ мкм} \div 1 \text{ мм}$, работающих при ламинарном режиме течения теплоносителей [5]. Несмотря на отсутствие турбулентного перемешивания, в микроканальных теплообменниках обеспечивается высокая интенсивность теплопередачи, благодаря малым значениям термических сопротивлений (δ / λ) стенок и теплоносителей. Поверхность теплопередачи в расчете на единицу объема достигает исключительно больших значений порядка $10^4 \text{ м}^2/\text{м}^3$. В результате для объемной плотности теплового потока получаются экстремальные значения порядка $10^8 \text{ Вт}/(\text{м}^3\text{К})$ (в расчете на единичный температурный напор). Сказанное в равной мере относится к диффузионным процессам в микрореакторах, испарителях, конденсаторах и т.п.

Центральным пунктом главы является численное моделирование *двухмерной сопряженной задачи* для температурного поля (см. пример на рис. 13) в потоке жидкости и в твердой структуре. Учитывается возможная сильная неоднородность температуры и плотности теплового потока по периметру микроканалов и вычисляется эффективный коэффициент теплопередачи как функция от геометрии микроструктуры и соотношения теплопроводностей теплоносителя и твердого скелета.

3. Компьютерные программы

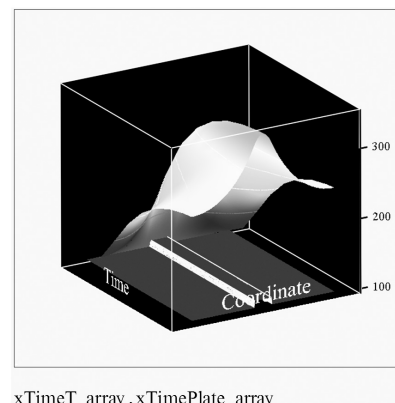
Второй, после электронной книги, структурной единицей электронного курса является обширная *коллекция Mathcad-программ*, начиная от служебных блоков для графического представления функциональных зависимостей до алгоритмически сложных профессиональных программ. Доступ осуществляется как из текстовой

части электронного курса по гиперссылкам, так и непосредственно из пункта «Mathcad-документы» основной страницы. Кроме оформленных Mathcad-документов, остались доступными для пользователя многие пробные версии, которые могут быть полезными при освоении техники работы в пакете Mathcad.

4. Компьютерные лабораторные работы

Лабораторные работы (третья структурная часть электронного курса) – это эксперименты с компьютерными моделями тепловых устройств в режиме пользователя. Опираясь с входными данными (параметрами модели), необходимо найти, визуализировать и осмыслить реакцию модели на внешние воздействия. В более широкой постановке возможны (и доступны) эксперименты со структурой компьютерной модели, т.е. с изменением программного кода в пакете Mathcad. Во всех случаях в задание входит постановка на компьютерной модели краевых условий, адекватных реальной ситуации в техническом устройстве или в природе, и это является центральной методической задачей виртуальной лабораторной работы.

В лабораторной работе «Численное моделирование температурных полей радиационных поверхностей» предметом исследования являются нестационарные одномерные температурные



xTimeT_array, xTimePlate_array

Рис. 14. Пространственно-временная диаграмма изменения температуры орбитальной платформы (математический пакет Mathcad)

поля в тонкостенных конструкциях (оболочках, пластинах, ребрах) с *радиационным теплообменом* на поверхности. Одним из приложений является задача об отводе теплоты с целью поддержания необходимого температурного режима *орбитальной платформы* (рис. 14). В экспериментах с компьютерной моделью исследуется зависимость оптимизируемого параметра – максимальной температуры объекта – от варьируемых проектных параметров (геометрических параметров, мощности тепловыделения, радиационных характеристик). Особый интерес представляет влияние специальных селективных покрытий.

Метод линейного источника – это один из нестационарных методов измерения коэффициента теплопроводности веществ. Его простейшая реализация – тонкая проволока электрического нагревателя, запрессованная между пластинами из испытуемого материала. В виртуальной лабораторной работе исследуется функционирование прибора на его полной компьютерной модели, в то время как *стандартный метод* основывается на асимптотике линейного источника в *неограниченном* массиве.

Такая постановка компьютерной лабораторной работы соответствует понятию *численного эксперимента*. Исследователь сохраняет полный контроль над содержанием модели, проводит тестирование на асимптотичес-

ких ситуациях и, далее, изучает новые режимы, изменяя входные параметры и анализируя отклик модели. При этом мы не считаем необходимым имитировать внешние атрибуты лабораторной установки, такие как шкалы измерительных приборов и ручки управления, полагая, что это относится к специальной области – разработке тренажеров для технического персонала.

Стендовая лабораторная работа «Измерение теплопроводности воздуха методом нагретой нити» поддерживается *компьютерной моделью*. При экспериментах на виртуальной установке имитируется статистический разброс данных и исследуются режимы с малыми измеряемыми перепадами температуры, чтобы оценить точность прибора. Компьютерная модель служит эффективным средством юстировки реальной лабораторной установки.

Компьютерная лабораторная работа «Исследование импульсных и периодических тепловых воздействий» (рис. 15) ставится на базе гл. 10 электронного курса «Исследование одномерных нестационарных температурных полей методом численного эксперимента».

Поскольку с температурными колебаниями часто имеют дело в природе и в технике, список возможных вариантов заданий очень широк. Например, в строительном деле, сельском хозяйстве, коммунальном хозяйстве важно знать, на какую глубину проникают в грунт суточные, сезонные или даже климатические температурные колебания. Это важная проблема также для строительства и эксплуатации различных трубопроводов, в том числе магистральных нефте- и газопроводов.

Температурные пульсации имеют место в стенках цилиндров двигателей внутреннего сгорания, что следует учитывать при прочностных расчетах.

Мощные импульсные воздействия характерны для многих новых технологий, в том числе для термоядерной энергетики, для лазерной или плазменной по-

верхностной термической обработки и т.п.

Температурные колебания используются для измерения теплофизических параметров, таких как температуропроводность.

Актуальной темой виртуальной лабораторной работы являются периодические тепловые режимы в регенеративных теплообменниках и в тепловых аккумуляторах.

Задачи о прогреве и остывании в больших пространственных и временных масштабах решаются при анализе космологических проблем (см., например, задачу Томсона об остывании Земли).

Стендовая лабораторная работа «Измерение теплоотдачи при поперечном обтекании цилиндра» поддерживается компьютерной моделью на базе интегрального метода пограничного слоя. Параллельное физическое (реализуемое в учебной лаборатории теплообменника) и компьютерное (в электронном курсе) моделирование проблемы является идеальной образовательной средой, аналогичной по структуре реальным проектам в промышленности.

Заключение

Начальная редакция электронного курса была опубликована на сайте: http://twf.mpei.ac.ru/solodov/HMT-eBook_2009/ Продолжается работа по его совершенствованию, подготовлена новая редакция, представленная в данной публикации и частично в учебных пособиях [6, 7]. Очевидны достоинства электронной формы учебника, дающие возможность перманентного совершенствования учебного материала, конъюнктурной правки, адаптации к меняющимся внешним требованиям.

Можно полагать, что учебный комплекс, построенный на концепции компьютерного моделирования, будет соответствовать новой инженерной парадигме: адекватные математические модели должны сопровождать сложные и потенциально опасные энергетические установки на всех стадиях их существования: при проектировании, изготовлении, испытаниях и эксплуатации.

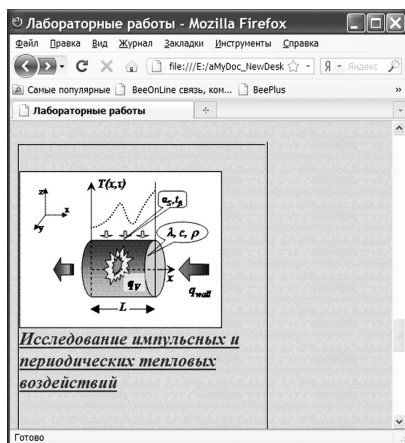


Рис. 15. Исследование импульсных и периодических тепловых воздействий

Литература

1. Солодов А.П. Контактная конденсация: межфазная турбулентность и тепломассообмен // Труды пятой Российской национальной конференции по тепломассообмену: в 8 т. (25–29 октября 2010, г. Москва). Т. 4. Кипение, кризисы кипения, закризисный теплообмен. Испарение, конденсация. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – С. 298–301.
2. Solodov, A., Ochkov, V. Differential models. An Introduction with Mathcad. – Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2004.
3. Солодов А.П. Дифференциальная модель пузырькового кипения // Теплофизика высоких температур. – 2007. – Т. 45. – № 2. – С. 226–235.
4. Солодов А.П. Дифференциальная модель тепломассообменника // Тепловые процессы в технике. – 2010. – № 8. – С. 364–370.
5. Солодов А.П. Микротеплообменники // Новое в российской электроэнергетике. – 2008. – № 5. – С. 11–27.
6. Солодов А.П. Математические модели пленочной конденсации: учебное пособие для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 119 с.
7. Солодов А.П. Электронный курс «Тепломассообмен в энергетических установках. Краткое содержание. Инженерные методы расчета»: учебное пособие по курсам «Тепломассообмен», «Тепломассообмен в оборудовании АЭС». – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 120 с. (в печати).